

# SWITCHING ELEMENT

Patent number: JP11287962  
Publication date: 1999-10-19  
Inventor: FOUQUET JULIE E; DONALD DAVID K; CHEN DATONG; CHANG KOK WAI  
Applicant: HEWLETT PACKARD CO  
Classification:  
- International: G02B6/35; G02B6/02; G02B6/30; G02B6/36;  
G02B6/35; G02B6/02; G02B6/30; G02B6/36; (IPC1-7);  
G02B6/08; G02B6/28; H01B11/00  
- european: G02B6/35E; G02B6/35L; G02B6/02L  
Application number: JP19990025232 19990202  
Priority number(s): US19980018772 19980204

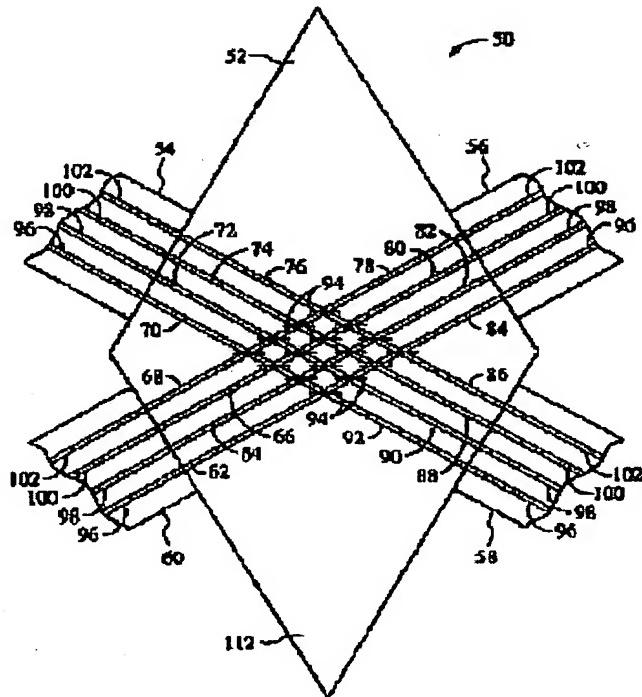
Also published as:  
 EP0935149 (A2)  
 US5960131 (A1)  
 EP0935149 (A3)  
 EP0935149 (B1)  
 DE69814330T (T2)

[more >>](#)

[Report a data error here](#)

## Abstract of JP11287962

**PROBLEM TO BE SOLVED:** To reduce the coupling loss between fiber waveguides and to reduce the transmission loss sent through a gap filled with a fluid between a couple of waveguides. **SOLUTION:** In the switching element 50 which couples waveguides 62, 64, 66, 68, 70, 72, 74, and 76 being 1st optical paths selectively with waveguides 78, 80, 82, 84, 86, 88, 90, and 92, being 2nd optical paths the 1st and 2nd optical paths having tapered areas gradually decreasing sectional area from 1st sectional area to smaller sectional area are coupled with a substrate waveguide 52 and include 1st and 2nd optical fibers 96, 98, 100, and 102 having tapered areas formed to decrease more the sectional area as they go away from the gaps of grooves 94 between the 1st and 2nd optical paths.



(19)日本特許庁 (JP)

(12) 公開特許公報 (A)

(11)特許出願公開番号

特開平11-287962

(43)公開日 平成11年(1999)10月19日

(51)Int.Cl.<sup>a</sup>  
G 0 2 B 26/08  
6/28  
H 0 1 B 11/00

識別記号

F I  
C 0 2 B 26/08  
H 0 1 B 11/00  
C 0 2 B 6/28

H  
L  
Z

審査請求 未請求 請求項の数1 OL (全 11 頁)

(21)出願番号 特願平11-25232

(22)出願日 平成11年(1999)2月2日

(31)優先権主張番号 09/018-772

(32)優先日 1998年2月4日

(33)優先権主張国 米国(US)

(71)出願人 398038580

ヒューレット・パッカード・カンパニー  
HEWLETT-PACKARD COMPANY

アメリカ合衆国カリフォルニア州パロアルト  
ハノーバー・ストリート 3000

(72)発明者 ジュリー・イー・フォウシエット  
アメリカ合衆国 カリフォルニア、ポートラ・パレイ、ヒルブロック・ドライブ 48  
(74)代理人 弁理士 萩野 平 (外4名)

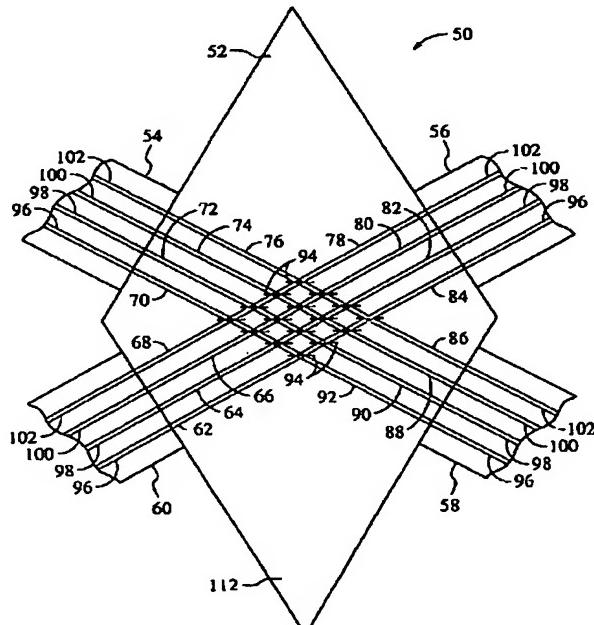
最終頁に続く

(54)【発明の名称】スイッチング素子

(57)【要約】

【課題】 ファイバー導波管間の結合損失を低減でき、一对の導波管間において流体で充填されたギャップを介した伝送損失を低減できる。

【解決手段】 第1の光路である導波管62, 64, 66, 68, 70, 72, 74, 76を第2の光路である導波管78, 80, 82, 84, 86, 88, 90, 92と選択的に結合するスイッチング素子50において、各々が断面積が第1の断面積から小さい断面積に徐々に減少するテーパー領域を有する第1及び第2の光路は、基板導波管52に結合し、第1及び第2の光路の間ににおける溝94のギャップから離れるとともに光路の断面積が減少するテーパー領域が形成されている第1及び第2の光ファイバ96, 98, 100, 102を含んでいる。



## 【特許請求の範囲】

【請求項1】 第1の面を有した基板導波管(52；124)と、前記第1の面に沿って溝(94；156)のギャップまで延びた光伝送を行うための第1の導波管及び第2の導波管(62～92；126；158，160，162及び164)であり、前記第1の導波管及び第2の導波管の間における光学的結合が前記ギャップ内部の光学特性に依存するように配置され、それぞれが前記ギャップにおいて各々が第1の断面積を有する内側領域(114)の内側端とテーパー領域(110)の外側端とを有する前記第1の導波管及び第2の導波管と、前記ギャップ内部の光学特性を、前記第1の導波管及び第2の導波管が光学的に結合した第1の状態から前記第1の導波管及び第2の導波管が隔離された第2の状態に切り換える機構(150及び152)と、前記第1の導波管の前記外側端と結合して前記ギャップに交わる第1の光路を形成する第1の光ファイバ(96，98，100及び102；116；138，140，142及び144)と、前記第2の導波管の前記外側端と結合して前記ギャップと交わる第2の光路を形成する第2の光ファイバ(96，98，100及び102；116；138，140，142及び144)とを有し、前記第1の光路及び第2の光路が各々、断面積が前記第1の断面積から小さい断面積へと徐々に低減するテープ領域(110；122)を有することを特徴とするスイッチング素子(50；166)。

## 【発明の詳細な説明】

## 【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、光学スイッチング素子に関し、特に、光ファイバと基板導波管との間における信号交換を行うスイッチング素子に関する。

## 【0002】

【従来の技術】従来、電話通信網及びデータ通信網における信号交換は、電導線を通じて電気信号を送信して行っている。データ交換の他の手段の一つは、光ファイバを通じた光信号の伝送である。光信号を効率的に生成する伝送装置が開発されて用いられているが、電話通信網及びデータ通信網で使用される光学スイッチでは、その設計上に問題がある。データ通信網では、情報が固定長のパケットに分割されて伝送され、伝送先の装置で再編成されるパケット交換技術が利用されている。このパケット交換では、システムの伝送リソース(resource)を効率的に利用できる利点がある。

【0003】光学スイッチによるパケット送信の欠点は、そのスイッチング装置の開発が、同等の電気スイッチング装置程度まで進展していないことである。とりわけ、容易に使用できる光学メモリがないことが、その障害となっている。通信を行う企業では交差接続した光学

回路スイッチ(optical cross-connect circuit switch)が、光ファイバ間の高ビットレート信号のルーティングに利用されている。これらは、特に、異なる波長の並列チャンネル(parallel channel)を利用することによって、情報容量が増加する波長分割多重方式(WDM,wavelength division multiplexing)を採用したシステムにおいて、特に便利である。この種のスイッチは市販されているが、サイズが大きく、また、機能が低く、又は、価格が高く、これらのいずれか、又はこれらの要因が組み合わさって、利用し難い状況にある。

【0004】本発明の発明者のFouquetその他に譲渡された米国特許5699462号では、複数の中のいずれか1本の入力用並列光学ファイバから複数の中のいずれか1本の出力用並列光学ファイバへの光信号のルーティングに利用できるスイッチング素子のマトリクスについて、その記載がなされている。また、機能的に関連したスイッチング素子のマトリクスが、Jacke 1その他の米国特許4988157号に記載されている。

【0005】図10は従来における光学スイッチング素子10の構成を示す上面図である。また、図11は従来における4×4の光学スイッチング素子10のマトリクス32の構成を示す図である。図10に示す光学スイッチング素子は基板上に形成されている。この基板はシリコン基板が適切であるが、その他の材料を利用しても良い。光学スイッチング素子10は、下部のクラッド層14とコア16と上部のクラッド層18とで画定されるプレーナ導波管(planar waveguide)を有している。コアは基本的に二酸化珪素であるが、コアの屈折率に影響を与える他の材料でも良い。クラッド層は、光信号がコアに沿って導かれるように、コアの材料の屈折率とは実質的に異なる屈折率を有する材料で形成する必要がある。

【0006】コア16は、第1の導波経路の入力導波管20及び出力導波管26を画定し、また、第2の導波経路の入力導波管24及び出力導波管22を画定するようにパターニングされている。コアを介してシリコン基板までに溝(trench)28がエッチングされている。導波管は、溝が蒸気又は気体で満たされている場合、この溝に、内部全反射(total internal reflection)(以下、「TIR」と記載する)の臨界角よりも大きな入射角で交わる。したがって、一直線に並んだ入力導波管20及び出力導波管26のセグメント間のギャップに屈折率整合材(index-matching material)が配されていない限り、TIRは入力導波管20からの光を出力導波管22に偏向させる。理想的には溝28が四つの導波管に対し、溝の側壁の一つが導波管の軸の交点を直接通過するように配置する。

【0007】図11における4×4のスイッチング素子のマトリクス32において、四つの入力導波管34, 3

6, 38及び40のいずれかの1本は、四つの出力導波管42, 44, 46及び48のいずれか1本と結合している。このスイッチング素子の配列により、いずれの接続が既になされていても、いずれかの入力ファイバを、いずれかの出力ファイバと接続できる。このためこのスイッチング素子の配列は「ノン・ブロッキング（non-blocking）」と呼称される。

【0008】16個の光学スイッチング素子のそれぞれは、屈折率整合液（index-matching liquid）が無い場合はTIRが発生する溝を有しているが、特定の導波管経路の同一線上のセグメント（segment）は、その同一線上のセグメント間のギャップが屈折率整合流体（index-matching fluid）で満たされている場合は光学的に結合する。導波管のギャップが屈折率整合流体で満たされている溝は、配列された導波管の交差部を角度を有して通過する細い線で形成されている。一方、ギャップに屈折率整合流体が無い溝は、配置された導波管の交差部を通過する太い線で形成されている。

【0009】図10及び図11の入力導波管20は、空の溝28における反射の結果、出力導波管22と光通信中となる。入力導波管34と出力導波管44との通信を可能にする他の全ての交点は伝送状態であるため、入力導波管34で生成された信号が出力導波管44で受信されることになる。同様に、入力導波管36は第1の出力導波管42と光学的に結合し、第3の入力導波管38は第4の出力導波管48と光学的に結合し、更に、第4入力導波管40が第3の出力導波管46と結合している。

【0010】図10に示す種類の光学スイッチング素子を伝送状態から反射状態に変更する技術は、その複数が知られている。上述したJacket 1その他による米国特許4,988,157号では、電気化学的に生成される気泡が形成されるまで、水又は屈折率整合液が導波管間のギャップを満たしている。一对の電極が配置することにより電解的に液を気泡で置き換える。同一線上の導波管間のギャップにおける気泡は屈折率の不整合を作り出し、溝の側壁に光を反射させる。気泡は、適切な極性を有した第2のパルスにより除去できるものであり、この気泡が除かれてスイッチが伝送状態に戻る。

【0011】日本国特開平8-94866号公報（サトウその他の特願平6-229802号）では、二つの導波管が交わるギャップへ、又はギャップから屈折率整合液を供給および除去するためのヒーターの使用について記載している。液体の流れはヒーター素子を選択的に活性化させて制御される。

【0012】スイッチング素子のマトリクスにおける伝送損失の要因としては、光学ファイバと導波管間のインターフェースにおける結合損失や、導波管に沿った伝送損失、及び一つの導波管から同一線上の導波管へ伝送するために屈折率整合液で満たされた溝を横切る際に発生する伝送損失がある。従来の光ファイバは約8μmの直

径である。結合損失を制御するには、導波管のコアを実質的に光ファイバの直径と整合するように作製すれば良い。上述した特開平8-94866号の公報では、導波管の厚さと幅の両方が約8μmであり、コアが四角い断面の寸法を有する製造方法について説明している。前述したJacket 1その他による米国特許4,988,157号では、導波管のコアは単一モードのファイバの直径と略整合する約7μmの厚さを有している。急峻な寸法の変動は伝送損失及び信号反射の両方を発生させる。

【0013】光ファイバと導波管との間のインターフェースにおける結合損失を最小限にするための導波管の寸法の選択は、スイッチング機能における各種の最適化によって、その最適な選択が出来ない。結果的には妥協（トレードオフ）が必要となる。導波管と交わる溝の幅によっては、幅広の導波管が、流体で充填されたギャップでの伝送損失を減少させることもある。例えば、より大きな損失が許容されるアプリケーション（例えば、データ通信）においては、標準の8μmの光ファイバを、幅および厚さがより大きな導波管に、接続するのが最適である。この結果、溝とのインターフェースにおける断面の寸法がより大きくなることで高い性能は得られるが、結合損失が発生した状態で使用することになる。

#### 【0014】

【発明が解決しようとする課題】このように上記従来例では、導波管の寸法、ギャップの寸法、そしてファイバの寸法を選択する際に、その性能を制限しない光学スイッチング素子が要求される。すなわち、必要とされているのは、ファイバー導波管間の結合損失が低く、一对の導波管間における流体で充填されたギャップを通じた伝送損失が低い光学スイッチング素子である。

【0015】本発明は、このような従来の技術における課題を解決するものであり、導波管の寸法、ギャップの寸法、そしてファイバの寸法を制限することなく、ファイバー導波管間の結合損失を低減できるとともに、一对の導波管間において流体で充填されたギャップを通じた伝送損失を低減できる光学スイッチング素子の提供を目的とする。

#### 【0016】

【課題を解決するための手段】上記課題を達成するためには、本発明は、第1の光路を第2の光路と選択的に結合するスイッチング素子において、第1の光路及び第2の光路は基板導波管に結合した光ファイバを含んでおり、それぞれの光ファイバは、更に二つの光路間のギャップから離れるとともに光路の断面積が減少するテーパー領域（taperingregion）を有している。

【0017】第1の実施形態では、光路のテーパー領域が導波管に沿って形成されている。2本の導波管のそれぞれは、第1の断面を有した内側領域の内側端を有している。内側端は、二つの光路を光学結合する時期を決定するために光学特性をその中に変化させるギャップに位

置している。第1の断面の面積はギャップ全体を通じて高い結合効率が得られるように選択される。導波管は、ファイバへの高い結合効率が得られるように設計された第2の断面の面積に向かって徐々に細くなっている。

【0018】第2の実施形態では、テーパー領域が光ファイバに沿って形成されている。コアが拡大したTEC(thermally expanded core)ファイバを、例えば、光路を第1の断面積から小さい第2の断面積にテーパリングするために利用しても良い。

【0019】多くのアプリケーションでは、2本の光路間に比較的広いギャップを形成することが有利である。例えば、ギャップが、その中でギャップにおける屈折率整合液の有無を決定するために気泡を操作する屈折率整合液を含んだ溝の一部である場合、溝の幅が比較的広ければ(例えば、 $15\mu m$ と比較して $25\mu m$ )、気泡の動きの信頼性が高くなる。約 $16\mu m$ の側面を有する実質的に四角い導波管では、屈折率整合液を介しての第1の光路から第2の光路への光信号の通過が低い損失で行われる。

【0020】しかしながら、比較的大きい導波管は、光信号が導波管から出力されて $1.55\mu m$ 単一モード通信アプリケーション用の約 $7\mu m$ 又は $8\mu m$ のコアの直径を有する標準単一モードのファイバに入力される時点で、急激な寸法変化によって大きな結合損失が発生する。光路のテーパー領域は、導波管-ファイバ間の結合効率と溝を越える時の結合効率との間の妥協による悪影響を低減する。

【0021】光路のテーパー領域は理想的に「断熱(a diabatic)」である。すなわち、テーパリングされた導波管/ファイバの断面積は、距離とともに徐々に変化し、導波管/ファイバの最低次のローカルノーマルモード(the lowest order localnormal mode)はパワーの累積移行を行わないでテーパー領域を通過して高次のローカルノーマルモード(higher order local normal mode)に伝搬される。これによって、テーパー領域中の反射が最小限となる。実用上では、導波管の高さが、例えば、約 $8\mu m$ と一定に保持されるのに対して、導波管の幅をフォトリソグラフィー(photolithography)技術により補足することが出来る。

【0022】テーパー領域が光ファイバに沿って形成される第2の実施形態では、TECファイバをフェルール又はシリコン基板中のV字型の溝に配置し、導波管を含む基板への接続を行うためのリボンコネクタ(ribbon connector)を形成する。

【0023】したがって、本発明により、スイッチング素子の配列を形成することができる。正確に配置されたTECファイバの全てを正確に配置された基板導波管に能動的に整合させるために、リボンコネクタの反対端にある二つのTECファイバからの光学結合を使用することができます。リボンコネクタは、その後、基板導波管に

屈折率整合エポキシ(index-matching epoxy)で接着される。この方法の利点は厚さおよび幅の寸法が対称(例えば、 $16\mu m \times 16\mu m$ )な導波管が使えることであり、そのため入力信号の偏光成分の両方が同等に扱われ、偏光依存損失の潜在性が減少する。

【0024】このスイッチング素子の優れた点は、導波管の製造法に著しい変更を加えずに得られることにある。第2の実施形態では、テーパー領域が光ファイバに沿った位置にあるため、導波管の製造に何等の変更も必要としない。前記したように、幅広の溝が有利なアプリケーションには導波管の内側端の断面積が大きい方が好ましい。気泡操作の代わりに、溝を屈折率整合流体又は不整合流体(例えば、空気)で充満させて、二つの導波管間のギャップへと移動する位置可変のミラーを用いて光信号を第3の導波管に偏向するようにしても良い。

【0025】このミラーの動きは導波管の上面に対して垂直方向でも良い。また、溝の長さに沿った方向でも良い。微小加工された駆動器(micromachined actuator)をミラー操作のために使用する場合、溝の幅は駆動器を収容するために十分広くなければならない。したがって、気泡操作と同様、ミラー操作も損失を制御するためには導波管のサイズに条件を付けることになる。

【0026】このように、本発明の導波管を備えるスイッチング素子では、第1の光路を第2の光路と選択的に結合し、この第1の光路及び第2の光路は基板導波管に結合し、二つの光路間のギャップから離れるとともに光路の断面積が減少するテーパー領域が導波管または光ファイバに沿って設けられている。

【0027】この結果、導波管の寸法、ギャップの寸法、そしてファイバの寸法を制限することなく、低いファイバー導波管間の結合損失とともに、一对の導波管間の流体で充填されたギャップを通じた伝送損失を低減できるようになる。

#### 【0028】

【発明の実施の形態】次に、本発明の導波管を備えるスイッチング素子の実施の形態を図面を参照して詳細に説明する。図1は本発明の実施形態によるテーパー領域を有する導波管を含む光路を有したスイッチング素子50のマトリクスを示しており、このスイッチング素子50の光学的なルートを表すマトリクスは、第2の基板である四つの光ファイバが配列したファイバ配列基板54, 56, 58及び60に取り付けられた導波管を含む基板である基板導波管52を含んでいる。基板導波管はシリコンチップであるのが最適であるが、他のシリカのような材料を用いても良い。シリコン基板の利点は、光を伝送する導波管の構造及び流体を注入するための穴を形成するための集積回路の製造技術を利用し易いところにある。

【0029】基板導波管52は四辺で構成されている。隣り合った辺の角度は、図10をもって説明したタイプ

の溝と交わる導波管の角度をもって決定する。基板が正方形であり、個々の導波管が基板の端から直角に延びるように作製されている場合、それぞれの光学スイッチング素子は実質的に図10の光学スイッチング素子10と等しい。なお、適切な実施形態は導波管の溝への入射角は、45度から60度の範囲である。

【0030】図1には示していないが、基板導波管52とそれぞれのファイバ配列基板54, 56, 58及び60とのインターフェースは、意図的に、例えば、8度の角度で傾斜を設けることが出来る。この意図的な傾斜は、基板導波管52上の導波管とファイバ配列基板54, 56, 58及び60上の光ファイバとの反射強度を低減するために形成されている。

【0031】図1において、基板導波管52は、16本の入出力用の導波管62, 64, 66, 68, 70, 72, 74, 76, 78, 80, 82, 84, 86, 88, 90及び92を含んでいる。更に、スイッチングの柔軟性を増すために24個の中間導波管がある。導波管62を導波管84に光学的に結合させるためには、光信号は3本の中間導波管と隣り合う導波管間の四つの流体が充填されたギャップとを通過しなければならない。

【0032】図10をもって説明したように、ギャップは導波管の交点に溝を設けることによって形成することが出来る。図1では、溝は交点における線94で示されている。図1の最下部の溝が屈折率整合流体を含んでいなければ導波管62からの入力信号はいずれもTIRによって入出力導波管92に偏向される。一方、最下部の溝が導波管間のギャップに屈折率整合流体を有する場合は、導波管62からの光信号がその溝を通過して次の溝に伝搬される。流体の有無によって導波管62からの入力信号を、導波管86, 88, 90及び92のいずれかに偏向させることができる。この融通性は導波管62に隣接する他の3個の導波管64, 66及び68にも適合できる。

【0033】各々の導波管62～92において、コアは第1の屈折率を決定するGe又はTiO<sub>2</sub>が添加されたSiO<sub>2</sub>のような材料で形成されている。また、クラッドの材料は、基本的にはSiO<sub>2</sub>でも良いが、第1の屈折率とは異なる第2の屈折率を決定するB<sub>2</sub>O<sub>3</sub>及び/又はP<sub>2</sub>O<sub>5</sub>のような異なるドーパントを含有している。屈折率の違いによって光信号が導波管のコアに沿って導かれる。

【0034】個々のファイバ配列基板54, 56, 58及び60は、4本の光ファイバ96, 98, 100及び102を含んでいる。図1の実施形態において、光ファイバは、例えば、約8μmの直径を有した円形の断面のような、統一された寸法の断面を有した従来型のファイバである。ファイバ配列基板54～60上の光ファイバのピッチは、基板導波管52上の導波管62～92のピッチに整合する。この場合の許容ピッチは約250μm

であるが、500μmのような他の中央間の距離を採用しても良い。位置合せ工程では、特定のファイバ配列基板における外側2本の光ファイバ96及び光ファイバ102から結合した光を能動的に位置合せの処理に利用することが出来る。これはファイバのピッチが精密に保持されていれば可能である。

【0035】精度の高いファイバの位置合わせは、個々のファイバをフェルール又はシリコン基板にフォトリソグラフィーでバターニングされたV字型の溝上に取り付けることによって達成される。このような条件下では、一番外側の光ファイバ96及び導波管92の能動的な位置合わせが、中側にある光ファイバ98及び導波管100の精度の高い位置合わせに結びつくことになる。光ファイバと導波管は、その後、所定位置に屈折率整合エポキシを用いて固定される。この方法は、問題にならない微小の挿入損失であり、入力信号又は出力信号の光学的偏光成分の両方をできるだけ同一として取り扱えるとともに、潜在的偏光依存性損失を低減できる特徴を有している。なお、配列されたファイバの位置を固定し保持するため、代わりの方法を利用しても良い。

【0036】理想的には、導波管62～92が光ファイバ96～102と同一の断面の寸法を備えるのが最適である。しかしながら、基板導波管に円形の断面を有するように製造することは実現不可能である。更に、従来型ファイバの8μmというサイズは、一つの導波管から実質的に同一線上にある導波管へと通過するために光信号が流体が充填した溝を伝搬する導波管では必ずしも最適とはならない。

【0037】図2は、16×16のスイッチング素子のマトリクスでの損失が最大となる経路に沿って、流体で充填したギャップを通過する伝送中に損失した入射光の比率に対するギャップの幅を示したグラフであり、3本の異なるサイズの導波管に対する値を3本の曲線で表してある。このモデルにおいては、導波管は溝に垂直入射していると想定しているためギャップの幅は溝の幅と同一である。実際には、入射角は斜角である。したがって、溝における光信号の物理的な経路の長さは、溝の公称の幅より大きくなる。

【0038】第1の曲線104は導波管の断面の寸法が幅8μm厚さ8μmである場合のギャップの幅に対する伝送損失を比較したものである。第2の曲線106は幅16μm厚さ8μmの方形の断面を有した導波管における伝送損失である。第3の曲線108は16×16μmの正方形の断面を有した導波管の構造で得られた伝送損失である。ここでは、明らかに16μmの正方形の導波管は、ギャップの幅に関係なく、流体が充填したギャップを通過する際に最も低い伝送損失を得る。多少精巧ではあるが信頼度がより低いプログラムが傾斜角を入力するために使用されたが、このプログラムは16μm×8μmの導波管の寸法が、図2の第2の曲線106に示さ

れる結果よりも最適な結果が得られることを示している。

【0039】図1において、導波管62～92のそれぞれは、溝94にある内側領域の端に位置する内側端の比較的大きい断面積から光ファイバ96～102のいずれか1本とのインターフェースにおける比較的小さい断面積へ断熱的にテーパリングされている。内側端の断面の寸法は、溝94を通過して効率的な光学的な結合が得られるように選択される。導波管のテーパー領域の端に位置する外側端の断面の寸法は、光ファイバへの高い結合効率を得るように選択される。

【0040】ある実施形態では、断熱的なテーパーリングにより、断面の寸法が $16\text{ }\mu\text{m}$ の正方形から断面の寸法が $8\text{ }\mu\text{m}$ の正方形に形成される。この場合、他の実施形態を考えることができる。 $16\text{ }\mu\text{m}$ の値は特に最適値である。これは現在の導波管の製造技術から極端には離れずに、伝送損失を許容レベルにまで低減が可能なためである。更に、 $16\text{ }\mu\text{m}$ は、光信号の適正な側壁反射のために側壁の角度を小さくする程には大きくならない。 $35\text{ }\mu\text{m}$ の導波管では現在の技術で達成され得るものよりも側壁が基板に対し、より垂直に近くにする必要がある。

【0041】例えば、許容範囲である反射損失 $1.5\text{ dB}$ より優れた値を得るには、側壁が垂直から $0.5$ 度未満でなければならない。実際には、活性領域（active region）の幅が $4\text{ }\mu\text{m}$ から約 $35\text{ }\mu\text{m}$ であれば、これが達成される。しかし、ギャップを通過する際の伝送損失を許容の水準までにする場合、その範囲は $6\text{ }\mu\text{m}$ から $35\text{ }\mu\text{m}$ であり、最適な幅は約 $16\text{ }\mu\text{m}$ である。

【0042】図3は図1における4本の導波管のテープ一部分を示す上面図である。4本の導波管62～68のそれぞれは基板導波管52の端部112からの距離とともに、導波管の側壁が開いてゆくテーパー領域110を含んでいる。個々の導波管は、また、側壁が平行である内側領域114をも含んでいる。オプションとして、それぞれの導波管の端部112に近接した領域においても側壁を平行状態にし、二つの一定幅領域の間における中間領域をテーパー領域110としても良い。内側領域114は側壁同士が所望の間隔に達した位置から開始する。

【0043】側壁は内側領域にあっては互いに $16\text{ }\mu\text{m}$ 離れ、また、基板導波管52の端部112にあっては互いに $8\text{ }\mu\text{m}$ 離れているもので良い。図3に示していないが、導波管62～68の厚さが幅の寸法の変化に対応してテーパリングされている。しかしながら、より簡単に製造された実施形態では、幅 $16\text{ }\mu\text{m} \times$ 高さ $8\text{ }\mu\text{m}$ の導波管から幅 $8\text{ }\mu\text{m} \times$ 高さ $8\text{ }\mu\text{m}$ への单一寸法のテーパリングとなっている。

【0044】図1において、2本の溝94の間における中間導波管は、一定の断面の寸法を有しているのが最適

である。中間導波管にテーパリングを施しても、中間導波管は直接、光ファイバ96～102のいずれかと結合するものではないため、その利点は無い。

【0045】図1及び図3に示す実施形態に代わる例として、断熱的テーパリングをファイバのレベルで実施するものがある。すなわち、固定の厚さと固定の幅を有した基板導波管のコアとの整合を改善するために光ファイバのコアを拡大することが出来る。更に他の例では、導波管と光ファイバの両方に断熱的にテーパリングされた領域を設けることが出来る。

【0046】図4は第2の実施形態におけるTECファイバの部分構造図であり、図5は導波管に接続された図4に示すTECファイバの上面構造図である。コアが拡大したファイバの一つのタイプとして知られているのが、TEC（thermally diffused expanded-core）ファイバである。TECファイバ116は、ファイバの主部120に沿って一定の直径を有したコア118を有している。主部120は、図4に短く省略されている。ファイバの端部のテーパー領域122は一定幅の導波管126を有する基板導波管124に近づくに従って連続的に拡大するコアの直径を有している。従来型のTECファイバの拡大係数（expansion factor）は代表的には、2から5の範囲であり、テーパー領域122は代表的には4から6mmの範囲の長さを有する。従来型のTECファイバにおいて低い結合損失を得るのに適した導波管の寸法は、 $16\text{ }\mu\text{m} \times 16\text{ }\mu\text{m}$ である。これらのパラメータは、いずれも特定の条件に合わせて変更することが出来る。

【0047】TECファイバ116の端部のテーパー領域122における拡大したコア118は、より小径の光ファイバと比較して、光が横に広がる角度を小さくする。この光の広がる角度の縮小は、拡大係数と略等しい。TECファイバから発信された光信号の横広がりの縮小は、固定された幅の導波管126への高い結合効率が得られる。

【0048】図6はスイッチング素子の導波管に光学結合させるためにシリコン基板128上に置かれた4本の光学ファイバの端面図であり、図7は図6の構造における上部のシリコン基板146が光ファイバをトラップ（trap）した状態を示す斜視図である。図6及び図7を参照して、TECファイバ又は直径が固定されたファイバのいずれかを基板に正確に位置合せする実施形態を説明する。第2の基板であるシリコン基板128のような半導体基板をエッティングし、V字型の溝130、132、134及び136を形成する。この場合、従来の集積回路の製造技術を利用できる。例えば、溝を画定するマスクと、化学エッティング剤を使用したフォトリソグラフィーにより溝を形成しても良い。

【0049】重要ではないが、溝において他方の側壁に対する一方の側壁の角度は、 $70.5$ 度が最適である。

また、保護用コーティングを光ファイバ138, 140, 142及び144から除去するのが最適である。その後、コーティング材の無い光ファイバのコアを溝に配置する。シリコン加工技術の利用は、ファイバのコアの中央間におけるスペースを精密にすむことができる。この場合、1ミクロン未溝の公差が達成される。したがって、コアのピッチが導波管のピッチに正確に整合するよう製作することが出来る。

【0050】図7においては、対応するV字型の溝の配列を有する第2のシリコン基板146が下部のシリコン基板128に接着剤の層148によって固定されている。接着層の使用は特に重要では無い。代わりに2枚のシリコン基板を接着するのにウェハボンディング(wafer bonding)を用いても良い。単一モードのファイバ及び複数モードのファイバにおいてシリコン基板におけるV字型の溝の位置合せは、周知技術である。

【0051】TEC又は従来型ファイバのサブミクロンの位置合せ公差を実現するためのシリコン基板におけるマイクロマシン加工の利点は、単に端2本のファイバを端2本の導波管に合わせるだけで、全てのファイバの位置合わせが、基板導波管の同様に作製された配列で得られることにある。例えば、図1では、光ファイバ96と導波管62及び光ファイバ102と導波管68の位置合わせが得られれば、ファイバ配列基板60上の光ファイバ96～102を、導波管62～68に位置合せすることができる。この位置合せ工程は、ファイバと導波管の数が多い程その利点が大きい。

【0052】図8は反射状態と伝送状態の間を切り替えるために気泡を操作する技術を利用したスイッチング素子166を示す上面図であり、図9は図8において伝送状態のスイッチング素子166を示す上面図である。図8及び図9を参照して、スイッチング素子の使用における一つの実施形態を説明する。この実施形態では、流体を含んだ溝156の中における気泡154の位置を制御し、光学結合の状態を切り換える2個のマイクロヒーター150及び152が用いられている。溝の中の流体は、4本の導波管158, 160, 162及び164におけるコアの屈折率と実質的に整合する屈折率を有している。使用可能な液体としてはイソプロピルアルコールとグリセロールの組み合わせが周知である。なお、他に使用できる液体はMピロール(M-pyrol)である。

【0053】図8及び図9のスイッチング素子166の動作中は、マイクロヒーター150及び152中の1個が気泡を形成するに十分な高さの温度まで加熱する。一度形成されると気泡154は、マイクロヒーターへほとんど流動しないで所定位置に保持される。図8において、気泡は4本の導波管158～164の交差部に位置している。結果的に導波管158を通過する入力信号は、溝156に達した時点で屈折率が不整合となる。TRにより入力信号は、出力導波管164に偏向させら

れる。したがって、スイッチング素子は図8に反射状態として示される。マイクロヒーター150の動作は交差部における気泡を留める。したがって、このマイクロヒーターが動作している間は反射状態が保持される。

【0054】図9においては、導波管158～164の交差部にあるマイクロヒーター150は非動作であり、第2のマイクロヒーター152が動作している。気泡154は動作しているマイクロヒーターに強力に引き付けられる。これによって屈折率整合流体が導波管の交差部にあるギャップを溝たすことができる。導波管158は同一線上の導波管160と光学結合しており、また、導波管162は同一線上の導波管164と光学結合しているため、スイッチング素子は伝送状態となる。

【0055】気泡操作を利用してスイッチング素子を反射状態から伝送状態に切り換える代わりにミラーを利用しても良い。このミラーは流体が充填した溝の中で操作できる。デフォルトが伝送状態の場合、溝は屈折率整合流体で充満し、ミラーは導波管の交点から離れて配置される。入力用の導波管から交差する導波管に光束を偏向するためにミラーが交点の溝に挿入される。この実施形態においては、溝は図8及び図9に示す位置から若干離れている必要がある。溝の側壁の一つを、4本の導波管の軸における交点に位置させないで、ミラーをこの交点に置き換える必要がある。

【0056】ミラーの動きを基板導波管の上面に対して垂直な方向に誘導して、ミラーを交点へ、又は交点から移動させることができる。これに代えてミラーの動きを基板導波管の上面に対して平行な方向にしても良い。基板面に対して垂直な動きの実施形態では、多ピンドットマトリクスプリンタエンジン(multi-pin dot matrix printer engine)を修正した手段によって実施可能である。このようなプリンタエンジンのピンの間隔は、通常、スイッチング素子が推奨される、例えば、 $250\mu m$ ピッチという間隔よりも大きい。したがって、導波管の構造を大きくし、かつ、プリンタエンジンのピンの間隔と合わせることが必要である。これに代えて最近実用化されたマイクロ・エレクトロメカニカル・システム(micro-electromechanical system)(以下「MEMS」と記載する)駆動器は、基板面に対して垂直方向に位置転換が可能であり、ミラーを基板の上面で垂直に可動するために利用される。

【0057】従来型のMEMS駆動器を、溝の軸に対して平行な方向に、ミラーを操作するために利用しても良い。このような駆動器は、前記したタイプの光学スイッチング素子に使用される屈折率整合流体のような非導電性の流体が存在しても機能することができる。現在の静電駆動器技術(electrostatic actuator)では、約 $25\mu m$ の範囲の動きに制限されてしまうが、これは $16\mu m$ 幅の導波管を横切るために溝に沿った $32\mu m$ の長さの交差部から小さなミラーを動かすには適當ではない。

い。したがって、この第2のアプローチは、何かの改善が加えて静電駆動器の動作距離（throw）を更に増加するか、又は、ミラーと駆動器の組み合わせが約12.5 μm以下の溝に収容できるようになってミラーが25 μmより大きい距離を移動する必要性がなくなる場合に、その有効なアプローチとなる。

【0058】本発明では、溝の中に屈折率整合流体を有して、その説明及び図示を行ったが、他の実施形態も考えられる。例えば、空気等、導波管との屈折率整合性が悪い流体の中で溝に転置可能なミラーを収容するようにしても良い。その場合、2本以上の導波管の交差部にあるギャップの中におけるミラーの有無が導波管どうしを光学結合させるか否かを決定する必要がある。この実施形態では、溝への導波管の入射角は、屈折率整合流体がない場合TIRを誘発するものであってはならない。

【0059】この実施形態において考慮すべき問題は、反射防止用コーティングが施されていない限りほんの少しの光が導波管と空気のインターフェースで反射しクロストーク制御が難しく、また反射防止用コーティングを溝の垂直の側壁に付着させるのが困難である点である。しかしながら、インターフェースから反射し、反射経路に沿った導波管のコアに結合してしまう光を最低限に抑えることは可能である。すなわち、ミラーと導波管／空気のインターフェースとの間の間隔を選択することが可能である。

【0060】以下に本発明の実施の形態を要約する。

【0061】1. 第1の面を有した基板導波管（52；124）と、前記第1の面に沿って溝（94；156）のギャップまで伸びた光伝送を行うための第1の導波管及び第2の導波管（62～92；126；158，160，162及び164）であり、前記第1の導波管及び第2の導波管の間ににおける光学的結合が前記ギャップ内部の光学特性に依存するように配置され、それぞれが前記ギャップにおいて各々が第1の断面積を有する内側領域（114）の内側端とテーパー領域（110）の外側端とを有する前記第1の導波管及び第2の導波管と、前記ギャップ内部の光学特性を、前記第1の導波管及び第2の導波管が光学的に結合した第1の状態から前記第1の導波管及び第2の導波管が隔離された第2の状態に切り換える機構（150及び152）と、前記第1の導波管の前記外側端と結合して前記ギャップに交わる第1の光路を形成する第1の光ファイバ（96，98，100及び102；116；138，140，142及び144）と、前記第2の導波管の前記外側端と結合して前記ギャップと交わる第2の光路を形成する第2の光ファイバ（96，98，100及び102；116；138，140，142及び144）とを有し、前記第1の光路及び第2の光路が各々、断面積が前記第1の断面積から小さい断面積へと徐々に低減するテーパー領域（110；122）を有するスイッチング素子（50；166）。

【0062】2. 前記第1の光路及び第2の光路におけるテーパー領域（110）が、前記第1の導波管及び第2の導波管（62～92；158，160，162及び164）に沿って設けられている上記1記載のスイッチング素子（50；166）。

【0063】3. 前記徐々に小さくした断面の寸法は、前記第1の光ファイバ及び第2の光ファイバ（96，98，100及び102；116；138，140，142及び144）の断面の寸法に対応し、この寸法によって前記第1の導波管と前記第1の光ファイバ（62～92；158，160，162及び164）との間、及び第2の導波管と前記第2の光ファイバとの間における結合損失が低減される上記2記載のスイッチング素子。

【0064】4. 前記第1の光路及び第2の光路における前記テーパー領域（122）が、前記第1の光ファイバ及び第2の光ファイバ（116）に沿って設けられている上記1記載のスイッチング素子。

【0065】5. 前記第1の光ファイバ及び第2の光ファイバは、コアが拡張したTEC（Thermally Expanded Core）ファイバ（116）であり、前記テーパー領域（122）が、前記TECファイバと前記第1の導波管及び第2の導波管（126）の外側端とのインターフェースの近くに配置される上記1又は4記載のスイッチング素子。

【0066】6. 前記第1の導波管及び第2の導波管（126）は、前記内側端から前記外側端にわたって一定の断面の寸法を有する上記1，4又は5記載のスイッチング素子。

【0067】7. 前記テーパー領域（110；122）の寸法は、前記ギャップ（94；156）に近づくにつれて徐々に前記第1の光路及び第2の光路が断熱的に拡大（adiabatic expansion）するように画定される上記1，2，3，4，5又は6記載のスイッチング素子。

【0068】8. 複数の溝（94）を第1の面に有する基板導波管（52）と、それぞれが少なくとも一つの溝と交わり、かつ並行に位置する第1の導波管の端部を含む前記第1の面に沿った第1の光路（62，64，66，68，70，72，74及び76）の配列と、それぞれが前記第1の光路の一つと近接した溝の少なくとも一つと交わり、かつ、並行に位置する第2の導波管の端部を含む前記第1の面に沿った第2の光路（78，80，82，84，86，88，90及び92）の配列と、前記溝に対して選択的に移動可能な流体であって、前記第1の導波管及び第2の導波管の端部における屈折率に対応する屈折率を有し、前記第1の光路及び第2の光路の間の光学的結合が前記溝を有する前記第1の光路及び第2の光路の交差部における前記流体の有無に依存

する前記流体と、前記第1の導波管の端部に結合するコアが拡大した第1の光ファイバ(96, 98, 100, 102, 116, 138, 140, 142及び144)の配列であり、前記第1の導波管の端部に近づくごとに拡大するファイバのコアを備えて、前記第1の光ファイバと前記第1の光路との間の結合損失を制御する前記第1の光ファイバの配列と、前記第2の導波管の端部に結合するコアが拡大した第2の光ファイバ(96, 98, 100, 102, 116, 138, 140, 142及び144)の配列であり、前記第2の導波管の端部に近づくごとに拡大するファイバのコアを備えて、前記第2の光ファイバと前記第2の光路との間の結合損失を制御する前記第2の光ファイバの配列とを有する光学ルート・マトリクス(an optical routing matrix)を備えるスイッチング素子(50)。

【0069】9. 前記基板導波管(52)はフォトリソグラフィー技術が適用される材料によって形成された第1の基板であり、前記第1の光路及び第2の光路は前記第1の基板上のパターニングされた層で形成され、前記第1の光ファイバ(96, 98, 100, 102, 116, 138, 140, 142及び144)は、第2の基板(54, 56, 58, 60及び128)に位置し、前記第1の導波管の端部におけるピッチと整合するピッチを画定している光学ルート・マトリクス備える上記8記載のスイッチング素子(50)。

【0070】10. 前記第2の基板(54, 56, 58, 60及び128)は、フォトリソグラフィー技術が適用される材料で形成され、かつ、前記第1の光ファイバの前記ピッチを有する並行のV字型の溝(130, 132, 134及び136)を備え、前記第1の光ファイバ(96, 98, 100, 102, 116, 138, 140, 142及び144)が各々、前記V字型の溝の一つに配置される光学ルート・マトリクスを備える上記9記載のスイッチング素子(50)。

#### 【0071】

【発明の効果】以上の説明から明らかなように、本発明のコア拡大導波管を備えるスイッチング素子によれば、導波管の寸法、ギャップの寸法、そしてファイバの寸法を制限することなく、ファイバー導波管間の結合損失を低減できるとともに、一対の導波管間において流体で充填されたギャップを通じた伝送損失を低減できる。

#### 【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の実施形態によるテーパー領域を有する導波管を含む光路を有したスイッチング素子のマトリクスの上面図である。

【図2】16×16のスイッチング素子のマトリクスでの損失が最大となる経路に沿って、流体で充填したギャップを通過する伝送中に損失した入射光の比率に対するギャップの幅を示したグラフである。

【図3】図1における4本の導波管のテーパー部分を示す上面図である。

【図4】第2の実施形態におけるTECファイバの部分構造図である。

【図5】図5は導波管に接続された図4に示すTECファイバの上面構造図である。

【図6】スイッチング素子の導波管に光学結合させるためにシリコン基板上に置かれた4本の光学ファイバの端面図である。

【図7】図6の構造における上部のシリコン基板が光ファイバをトラップ(trap)した状態を示す斜視図である。

【図8】反射状態と伝送状態の間を切り替えるために気泡を操作する技術を利用したスイッチング素子を示す上面図である。

【図9】図8において伝送状態のスイッチング素子を示す上面図である。

【図10】従来における光学スイッチング素子の構成を示す上面図である。

【図11】従来における4×4の光学スイッチング素子のマトリクスの構成を示す図である。

#### 【符号の説明】

50, 166 スイッチング素子

52, 124 基板導波管

54, 56, 58, 60 ファイバ配列基板

62～92, 126, 158, 160, 162, 164  
導波管

94, 156 溝

96, 98, 100, 102, 116, 138, 140, 142, 144 光ファイバ

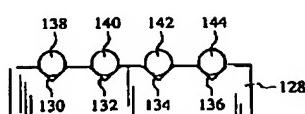
110, 122 テーパー領域

114 内側領域

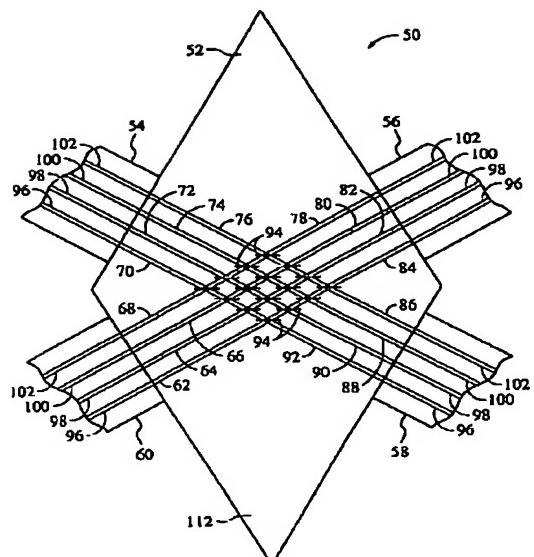
130, 132, 134, 136 V字型の溝

150, 152 マイクロヒータ

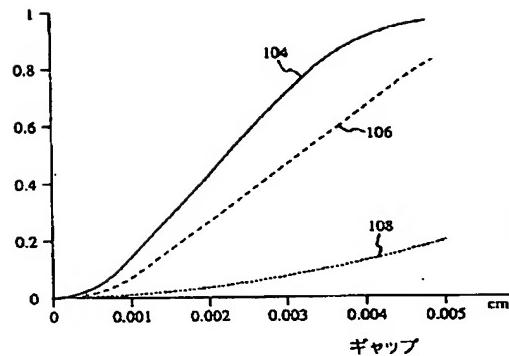
【図6】



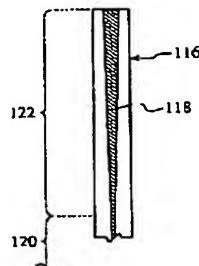
【図1】



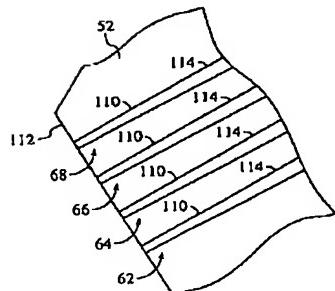
【図2】



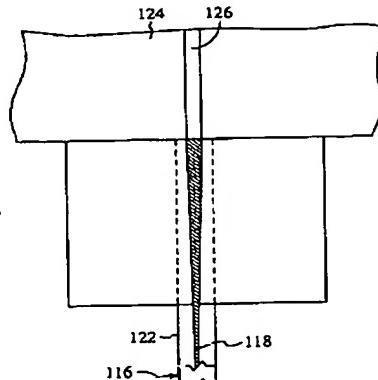
【図4】



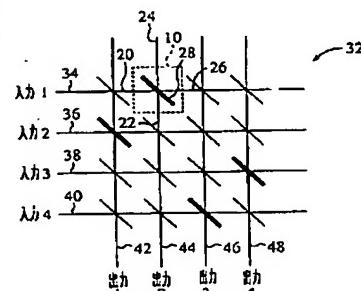
【図3】



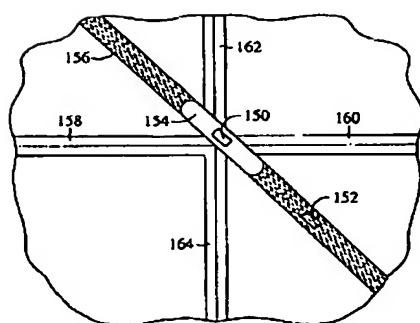
【図5】



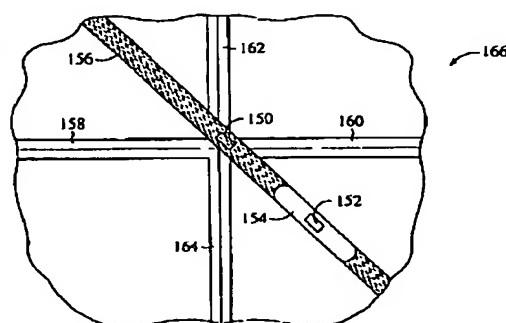
【図11】



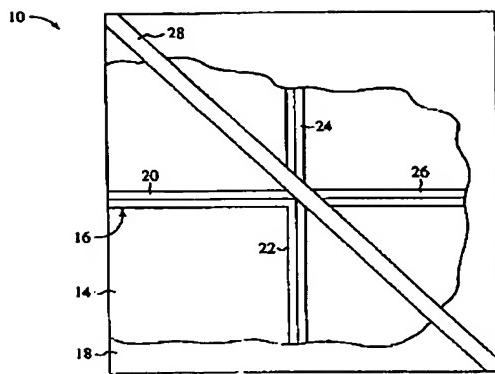
【図8】



【図9】



【図10】



フロントページの続き

(72)発明者 デビット・ケー・ドナルド  
アメリカ合衆国 カリフォルニア, マウン  
テンビュー, ナンバーダブル206, シャワ  
ース・ドライブ 49

(72)発明者 タートン・チェン  
アメリカ合衆国 カリフォルニア, サニ  
ヴェイル, マデラ・アベニュー ナンバー  
15 428

(72)発明者 コック・ワイ・チャン  
アメリカ合衆国 カリフォルニア, サニ  
ヴェイル, サーラス・アベニュー 174